

土石围堰安全分析及其除险加固措施研究

胡峥嵘, 池丽敏, 闫园园

(南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210006)

摘要:围堰是保证涉水工程干地施工的重要建筑物。在水力等外界因素作用下,其运行机制复杂。为有效反映渗流作用对围堰安全的影响,以某码头工程的围堰为例,对其安全性进行数值模拟。通过对围堰渗流场和应力场进行耦合分析和研究,计算其应力、位移、安全系数等相关参数。研究表明,流固耦合作用的计算结果有利于保证围堰的设计安全。

关键词:围堰;渗流;流固耦合;除险加固;数值模拟

中图分类号:TV551.3

文献标识码:A

doi:10.13681/j.cnki.cn41-1282/tv.2016.04.004

0 引言

围堰是保证涉水工程干地施工所建的临时性挡水建筑物,其安全问题关乎着主体工程的施工进度和施工安全。由于围堰失稳大多与渗流有关,因而防渗处理值得关注。目前,工程中围堰的设计计算都将渗流场和应力场分开。但是,在应力场、渗流场等多场并存的复杂环境中,由于各场间相互影响、相互作用,致使围堰的运行机制复杂。因此,对围堰进行稳定分析时,考虑流固耦合作用是很有必要的。罗晓辉基于基坑稳定流与非稳定流的数值分析,对基坑开挖过程中渗流场的变化规律以及对应力场产生的影响进行了探讨^[1]。徐则民等论述了渗流场与应力场耦合分析的基本原理及其在边坡稳定性评价中应用的理论基础和技术路线^[2]。程彬、卢靖等人采用软件 Geostudio 中的 Seep 和 Sigma 两个模块对陕西府谷县清水川电厂边坡进行耦合与非耦合分析,并根据应力场、边坡稳定性的差异,得出耦合分析下更符合实际的结果^[3]。本文以某码头工程围堰为例,分析计算流固耦合作用下该围堰的应力、变形等参数,提出了除险加固措施,评估加固效果。

1 流固耦合的基本原理

1.1 本构模型

1993 年, Fredlund 和 Rahardjio 将非饱和土体的二维本构模型的应力应变关系表示成公式(1),也可表示成增量应力应变形式,如公式(2)所示^[4]。

$$\begin{Bmatrix} \Delta(\sigma_x - u_a) \\ \Delta(\sigma_y - u_a) \\ \Delta\tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta(\varepsilon_x - \frac{u_a - u_w}{H}) \\ \Delta(\varepsilon_y - \frac{u_a - u_w}{H}) \\ \Delta\gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\{\Delta\sigma\} = [D] \{\Delta\varepsilon\} - [D] \{M_H\} (u_a - u_w) + \{\Delta u_a\} \quad (2)$$

式中: τ 为剪应力; ε 为法向应变; σ 为法向应力; ν 为泊松比; γ 为剪应变; H 为与基质吸力 ($u_a - u_w$) 有关的非饱和土模量; E 为弹性模量; D 为本构矩阵; $\{M_H\}^T = \left[\frac{1}{H} \quad \frac{1}{H} \quad 0 \right]$ 。

根据虚功原理,内虚功等于外虚功,则存在式(3)所示的关系式。

$$[K] \{\Delta\delta\} + [L_d] \{\Delta u_w\} = \sum F \quad (3)$$

式中: $[K] = [B]^T [D] [B]$, $[B]$ 为梯度矩阵; $[L_d] = [B]^T [D] \{M_H\} \langle N \rangle$, $[D]$ 为排水本构矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $[L_d]$ 为耦合矩阵; $\{\Delta\delta\}$ 为增量位移矢量; $\{\Delta u_w\}$ 为增量孔隙水压力矩阵。

1.2 渗流方程

对于单元土体,根据达西定律,渗流方程表示成公式(4)。

收稿日期:2016-07-17

作者简介:胡峥嵘(1983-),女,湖北红安人,工程师,硕士,主要从事水工结构设计。

$$\frac{k_x}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial x^2} + \frac{k_y}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_w}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

式中： k_x, k_y 分别为 x 和 y 方向的渗透系数； v_w 为渗透速度； γ_w 为水的重度； θ_w 为单位体积含水量； t 为时间。

对单元土体进行有限元分析，可得到一个包含增量孔隙水压力的渗流方程，如公式(5)所示^[5]。

$$\beta [L_f] \{ \Delta \delta \} - \left(\frac{\Delta t}{\gamma_w} + \omega [M_N] \right) \{ \Delta u_w \} = \Delta t \left(\{ Q \} \Big|_{t+\Delta t} + \frac{1}{\gamma_w} [K_f] \{ u_w \} \Big|_t \right) \quad (5)$$

式中： $[K_f]$ 为单元刚度矩阵； $[L_f]$ 为渗流耦合矩阵； $[M_N]$ 为质量矩阵； $\beta = \frac{E}{H} \left(\frac{1}{1-2\nu} \right)$ ； $\omega = \left(\frac{1}{R} - \frac{3\beta}{H} \right)$ ； R 为模量。

对式(2)、式(3)和式(5)联立求解，即实现耦合分析。在 Geostudio 中，流固耦合的实质是以比奥固

结理论为基础，用有限元建立的以节点位移和孔隙水压力为已知数，求解应力场和渗流场的方程组^[6]。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

某工业园区通用码头工程岸线总长 1910 m，在 12# 泊位基坑开挖至坑底设计标高(+4.6 m)时，前期的地质勘探孔处出现泉眼，数量较多，进而形成管涌，围堰发生渗透破坏，基坑被水淹没，其计算断面如图 1 所示。

该围堰从上到下依次分为 5 层，根据工程勘察报告，各土层材料参数如表 1 所示。

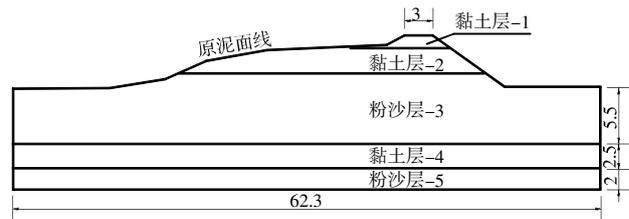


图 1 围堰计算断面(单位:m)

Fig.1 Cofferdam calculation section (Unit: m)

表 1 各土层材料参数表

Tab.1 Soil layer material parameter

土层	重度/(kN/m ³)	C/kPa	$\varphi/(^\circ)$	饱和渗透系数/(cm/s)	弹性模量/MPa
黏土层-1	14.9	36	12.6	1.80E-06	10.13
黏土层-2	15.4	66	12.0	1.40E-06	16.56
粉沙层-3	19.3	5	31.3	6.80E-03	25.40
黏土层-4	19.6	60	11.3	3.60E-05	21.80
粉沙层-5	20.8	5	31.6	7.10E-03	40.10

2.2 计算模型的边界条件

模型计算时，左右侧边界为法向支座约束，最底部边界采用固定约束，顶部为自由边界。

2.3 流固耦合计算流程

流固耦合的实现过程为：利用 Seep/w 模块进行初始孔隙水压力计算，并将结果导入到 sigma 模块，计算初始应力场。然后，根据初始孔隙水压力和初始应力，计算渗流场与应力场耦合，并将得到的结果导入下一步的耦合分析中。如此重复计算，即可得到每一步的计算结果。具体计算流程如图 2 所示。

2.4 渗流分析

一般认为，基坑底面的水力坡降对坑底抗渗稳定有关键性影响^[7]。该工程渗流计算结果如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 可知，围堰下游坡脚处的水力梯度较大，为 0.241，是基坑最易发生渗透破坏的部位，且坡脚处渗流流速较大。参考文献，管涌型土的临界水力梯度可按公式(6)计算^[8]。

$$i_{cr} = 2.2(G_s - 1)(1 - n)^2 \frac{d_5}{d_{20}} \quad (6)$$

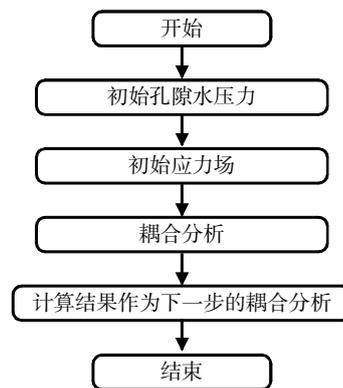


图 2 流固耦合计算流程图

Fig.2 Fluid-structure interaction calculation flow

式中： G_s 为土体比重； n 为土的孔隙率； d_5, d_{20} 分别为小于该粒径的土粒含量，分别为 5% 和 20%。

根据式(6)，计算出粉沙土层的临界水力梯度为 0.139。因此，可以判断围堰后基坑会发生管涌，影响施工进度及安全。

2.5 应力分析

图 5 和图 6 分别为流固耦合及非耦合作用下

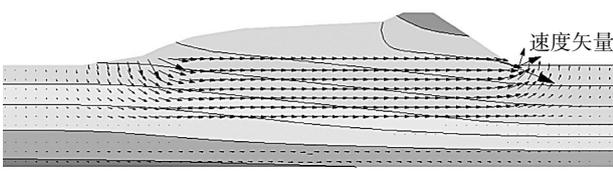


图3 渗流计算结果
Fig.3 Seepage calculation results

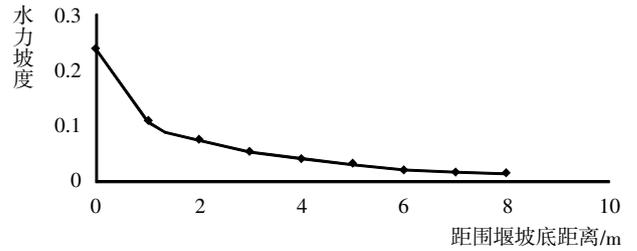


图4 围堰下游水力坡度
Fig.4 Cofferdam downstream hydraulic slope

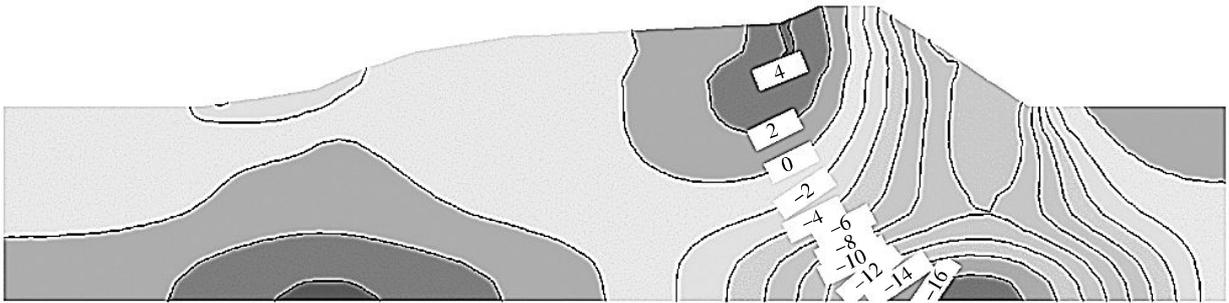


图5 无耦合下剪应力(单位:kPa)
Fig.5 Shear stress under no coupling (Unit:kPa)

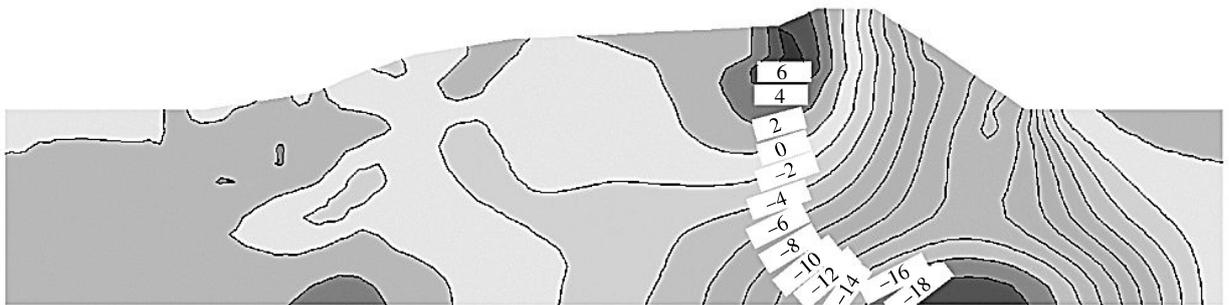


图6 耦合作用下剪应力(单位:kPa)
Fig.6 Shear stress under coupling (Unit:kPa)

围堰剪应力变化云图。由图5和图6可知,耦合作用下和整体剪应力大于非耦合作用下的整体剪应力。这说明,边坡因渗流作用产生的最大剪应力比静水压力作用产生的最大剪应力要大,边坡在渗流作用下,因剪切应力增大,更容易产生剪切破坏。

2.6 变形分析

图7和图8分别为流固耦合及非耦合作用下围堰剪位移变化云图。由图7和图8可知,耦合作用下的整体位移大于非耦合作用下的整体位移。这说明,结构计算时考虑渗流作用围堰变形比静水压力作用产生的位移要大。

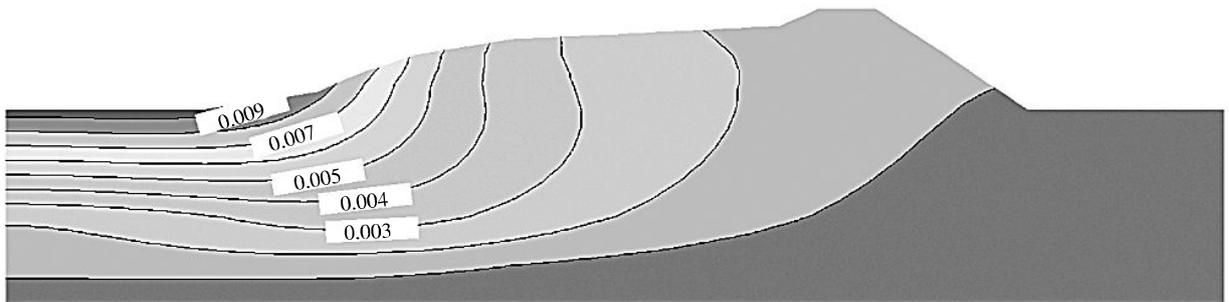


图7 无耦合下总位移(单位:m)
Fig.7 The total displacement under no coupling (Unit:m)

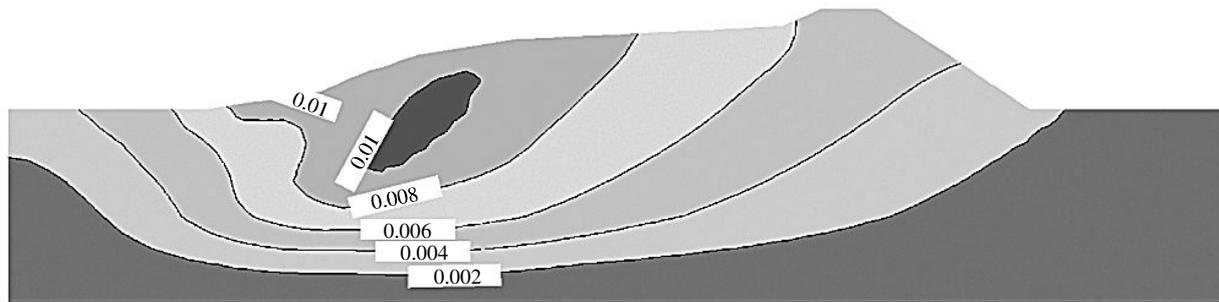


图8 耦合作用下总位移(单位:m)

Fig.8 The total displacement under coupling (Unit:m)

2.7 稳定分析

图9和图10分别为流固耦合及非耦合作用下围堰边坡稳定计算结果。由上述分析可知,考虑流固耦合作用,围堰整体应力和变形增大,更容易产生破坏,因此安全系数降低。其主要原因是,当水流入土体内部时,滑动力增大,使土体性质发生改变,抗剪强度降低。水在这里起到了“润滑剂”的作用^[9],与前述分析结论一致。因此,在进行围堰设计计算时,若合理考虑流固耦合作用,计算结果有利于保证围堰加固设计安全。



图9 无耦合下围堰边坡稳定分析

Fig.9 The slope stability analysis of cofferdam under no coupling

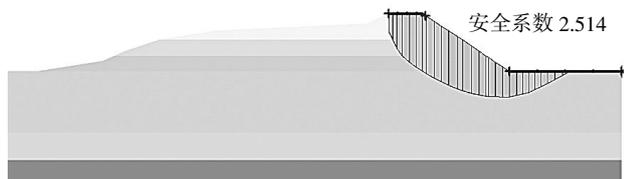


图10 耦合作用下围堰边坡稳定分析

Fig.10 The slope stability analysis of cofferdam under coupling

2.8 防渗分析

渗流作用是影响围堰安全的控制性因素,因此需对该围堰进行防渗处理。在水头差的作用下,粉沙土层渗透系数较大,抗渗性弱,是产生渗透破坏的主要因素。因此,为了阻断粉细沙层的透水,采用水泥搅拌桩对围堰进行止水加固。防渗墙加固深度需穿过粉沙层,进入黏土层。由此确定搅拌

桩有效桩长12m,单排布置,直径为700mm。图11为防渗加固后的渗流计算结果。由图11可知,加固后浸润线降低,坡脚水力梯度明显减小,最大为0.015,坡脚处渗流流速显著降低。这表明防渗加固效果较好。



图11 防渗加固后渗流计算结果

Fig.11 Seepage calculation results after reinforcement

3 结语

- (1)利用 geostudio 实现围堰渗流、应力变形、边坡稳定的数值模拟,可及时辨识围堰的安全性态。
- (2)考虑流固耦合作用对围堰安全的影响十分合理,计算结果有利于保证其设计安全。
- (3)对防渗加固措施进行数值模拟,可为加固效果的评估提供科学依据。

参考文献:

- [1] 罗晓辉.深基坑开挖渗流与应力耦合分析[J].工程勘察, 1996(6):37-41.
- [2] 徐则氏,黄润秋.基于水-力耦合理论的超深隧道围岩渗透性预测[J].成都理工学院学报,2001,28(2).
- [3] 程彬,卢靖.基于 Geostudio 的边坡渗流场与应力场耦合[J].山西建筑,2010(3),146-147.
- [4] 万文.水位循环升降下库岸边坡渗流与应力耦合分析及稳定性研究[D].南昌:南昌大学,2012.
- [5] 倪梅三,华跃.基于 Geostudio 的某土石坝稳定性流固耦合分析[J].矿业快报,2008(2):23-25.
- [6] John Krahn. Seepage Modeling with SEEP/W[S].Canada: EO-SLOPE International, LTD,2004.
- [7] 陶明星,刘建民.基坑渗流的数值模拟与分析[J].工程勘察,2006(1):23-25.

(下转第 23 页)

- [5] 张多新,王清云,白新理.大型U形薄壳渡槽动力分析[J].人民长江,2008,39(16):69-72.
- [6] 赵光恒著.结构动力学[M].北京:中国水利水电出版社,1995:144-147.
- [7] 白新理,朱尔玉,刘东常,等.渡槽施工期和运营期、动态跟踪、温度荷载及动力分析[R].郑州:华北水利水电学院,2007.
- [8] 李声平,彭翠玲,吴杰芳.大型U形双槽结构动力分析[J].长江科学院院报,2005,22(4):68-71.
- [9] 徐建国,王博.渡槽结构动力性能的有限元分析[J].郑州工业大学学报,1992(2):67-69.
- [责任编辑 杨明庆]

Influence of the Water Simplification Method to U-shaped Aqueducts Dynamic Characteristic

LI Tao-feng, Cao Lei

(Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: The influence of water in aqueduct on the construction cannot be ignored when calculating the aqueduct dynamic characteristics. With an aim at some aqueduct in South-to-North Water Diversion Middle Route Project, the numerical analysis model is established on the basis of the additional mass principle and the displacement-press format of the FSI system, and also, the dynamic characteristic are analyzed.

Key Words: South-to-North Water Diversion Middle Route Project; Aqueduct; the additional mass; the (u_t-p) format; fluid-structure interaction; dynamical characteristic; numerical analysis

(上接第 18 页)

[8] 卢廷浩.土力学[M].南京:河海大学出版社,2004.

[9] 张强勇,李晓静.紫坪铺高边坡稳定性的流固耦合计算分

析[J].人民长江,2005,36(11):45-47.

[责任编辑 杨明庆]

Study on Earth-rock Cofferdam Safety Analysis and Reinforcement Measures

HU Zheng-rong, CHI Li-min; YAN Yuan-yuan

(Nanjing Water Planning and Designing Institute CO. Ltd, Nanjing 210006, Jiangsu, China)

Abstract: Cofferdam is the important building to ensure the wading engineering performed in the dry land. Under the influence of external factors such as hydraulic power, its running mechanism is complex. In order to effectively reflect the influence of seepage effect on cofferdam safety, this paper takes the cofferdam of some dock project for example, and processes the numerical simulation on its safety. It calculates the related parameters such as stress, displacement and safety coefficient by coupling analysis and research of the cofferdam seepage field and stress field. Study shows that the calculation result of fluid-structure interaction is helpful to ensure the safety of the cofferdam design.

Key Words: Cofferdam; seepage; fluid-structure interaction; reinforcement